



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑯ Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

⑯ Int. Cl. 5:  
G 05 F 1/70

⑯ EP 0 258 314 B1

⑯ DE 37 87 335 T 2

DE 37 87 335 T 2

⑯ Deutsches Aktenzeichen:	37 87 335.0
⑯ PCT-Aktenzeichen:	PCT/US87/00220
⑯ Europäisches Aktenzeichen:	87 901 254.0
⑯ PCT-Veröffentlichungs-Nr.:	WO 87/04538
⑯ PCT-Anmeldetag:	22. 1. 87
⑯ Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung:	30. 7. 87
⑯ Erstveröffentlichung durch das EPA:	9. 3. 88
⑯ Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA:	8. 9. 93
⑯ Veröffentlichungstag im Patentblatt:	5. 1. 94

⑯ Unionspriorität: ⑯ ⑯ ⑯

22.01.86 US 821196

⑯ Erfinder:  
gleich Anmelder

⑯ Patentinhaber:

Vithayathil, John J., Portland, Oreg., US

⑯ Vertreter:

Herrmann-Trentepohl, W., Dipl.-Ing., 44623 Herne;  
Kirschner, K., Dipl.-Phys.; Bockhorni, J., Dipl.-Ing.,  
Pat.-Anwälte; Strasse, M., Rechtsanw.; Grosse, W.,  
Dipl.-Ing., 81476 München; Thiel, C., Dipl.-Chem.  
Dr.rer.nat., 44623 Herne; Dieterle, J., Dipl.-Ing.,  
Pat.-Anwälte, 04109 Leipzig

⑯ Benannte Vertragstaaten:

AT, BE, DE, FR, GB, IT, SE

⑯ SCHEMA ZUM SCHNELLEN EINSTELLEN DER NETZIMPEDANZ.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelebt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 37 87 335 T 2

EP 87 901 254.0  
VITHAYATHIL, John

#### GEBIET DER ERFINDUNG

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf die Steuerung der Übertragungsimpedanz in einem Wechselstromsystem insbesondere einschließlich von Leistungsübertragungssystemen. Im besonderen richtet sich die Erfindung auf den Gebrauch einer statisch gesteuerten Reaktanz, die in Reihe mit einem Übertragungssystem verbunden ist, um die wirksame Steuerung der Leistung oder des Stromes auf der Übertragungsleitung zu erleichtern.

#### HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Die zwischen zwei Punkten in einem AC-Leistungsübertragungssystem übertragene elektrische Leistung wird vornehmlich durch die Größe der Spannungen an den zwei Punkten, dem Winkel zwischen den Vektoren, die sich auf diese beiden Spannungen beziehen, und die Übertragungsimpedanz zwischen den beiden Punkten bestimmt. Die Leistung ist proportional der Größe der Spannung. Jedoch werden die Spannungsbeträge im allgemeinen in einem kleinen Bereich innerhalb bestimmter Grenzen geregelt, so daß sie innerhalb der maximalen Schaltungsgrenzen bleiben und nicht-akzeptable Spannungsschwankungen in den Versorgungsspannungen für den Verbraucher vermieden werden. Mit großen festgelegten Übertragungsimpedanzen ist der Grad der Leistungssteuerung durch Einstellung der Spannung begrenzt. Die übertragene Leistung ist ungefähr proportional dem Sinus des Winkels zwischen den beiden Spannungsvektoren. Es ist daher allgemein üblich, den Leistungsfluß durch Einstellung der Winkel zwischen den jeweiligen Spannungsvektoren zu steuern. Die Steuerung des Leistungsflusses durch Steuerung dieses Winkels zwischen den Spannungsvektoren wird im allgemeinen durch eine relativ langsame Einstellung der Dreh-

winkel von Synchronmaschinen erreicht. In einem solchen Fall ist der maximal erlaubte Winkel und damit die übertragene Leistung durch die Berücksichtigung von Systemübergängen und dynamischer Stabilität begrenzt.

Eine Anzahl von Verfahren mit reaktiven Nebenschlußgeräten wurde verwendet, um die Leistungsübertragungsfähigkeit und die Übergangs- und dynamischen Stabilitätsgrenzen zu erhöhen. Synchronkondensatoren, Nebenschlußkondensatoren, Nebenschlußreaktoren, geschalteten Thyristoren und/oder gesteuerten statischen VAR Kompensatoren und sättigbare Reaktorkompensatoren sind Nebenschlußgeräte, die für diesen Zweck verwendet wurden. Diese Verfahren werden manchmal als "Surge Impedance Compensation" oder "Compensation by Sectioning" bezeichnet.

Die Reihenkondensatorkompensation wird ebenso manchmal verwendet, um die Stabilitätsgrenzen zu verbessern und die Übertragungsfähigkeit durch verminderte Übertragungsimpedanz zu erhöhen. Dieses Verfahren wird manchmal als Leitungsstärkenkompensation bezeichnet und ist im wesentlichen eine passive Kompensationstechnik. Reihenkondensatoren wurden in begrenzter Weise von der Leitung zu- und abgeschaltet von der Leitung, um die Stabilität zu erhöhen. Andererseits können als eine passive Vorrichtung Reihenkondensatoren nicht für die glatte Steuerung der übertragenen Leistung verwendet werden. Da die übertragene Leistung umgekehrt proportional zur Übertragungsimpedanz ist, steigt die Wirksamkeit der Reihenkondensatorkompensation zum Vermindern der Übertragungsimpedanz und zum Anheben der Leistungsübertragungsgrenzen mit dem PEGEL der Reihenkondensator-kompensation an. Wenn beispielsweise die anderen Faktoren konstant sind, vermindert die 50%ige Reihenkondensatorkompensation die Übertragungsimpedanz um ungefähr die Hälfte der ursprünglichen Übertragungsimpedanz und verdoppelt die maximale Leistung in Hinsicht auf die Stabilzustandsstabilitätsgrenzen. Eine zusätzliche 25%ige Kompensation, welche die Übertragungsimpedanz um ein Viertel des ursprünglichen Wertes vermindern würde, würde die maxi-

male Leistung in Hinsicht auf die Stabilzustands-stabilitäts-grenzen um das vierfache des ursprünglichen Wertes erhöhen.

Trotz dieses überproportionalen Anstieges der Leistungsübertragung, der durch die ansteigenden Pegel der Reihenkondensatorkompensation verursacht wird, wurden hohe Pegel für die Reihenkondensatorkompensation bisher nicht verwendet. Es ist allgemein anerkannt, daß praktizierbare obere Grenzen des Grades der Reihenkompensation in der Größenordnung von 80 % liegen.

Dokument US-A-4 434 376 bezieht sich auf eine Vorrichtung zum Dämpfen von subsynchronen Oszillationen und des DC-Offsets in einem AC-Leistungssystem. Der Dämpfungsapparat, der darin beschrieben ist, umfaßt eine Reaktanz, die in Reihe mit einer Leistungsleitung mit selektiven zwei Richtungsleitern parallel mit der Reaktanz verbunden ist, wodurch die Reaktanz gekürzt werden kann. Ein Dämpfungswiderstand ist in dem Schaltkreis vorgesehen, wenn besonders problematische Bedingungen durch die Thyristoren festgestellt werden.

Dokument FR-A 2 137 013 offenbart eine Anordnung, um die Übertragungsimpedanz durch Zufügen einer einstellbaren kapazitiven Reihenreaktanz. Dadurch sind zwei Vorgehensweisen gegeben, welche beide gekennzeichnet sind durch die Einführung einer kapazitiven Kompensation durch einen Stromtransformator. Dies wird im ersten Fall durch Einstellung der Abgriffsänderungsstellung des Transformatoren und im zweiten Fall mechanisch durch Bewegen des Ankers eines Induktors mit Luflücke, der parallel mit einem Kondensator auf der Sekundärseite des Stromtransformators verbunden ist, erreicht. Es ist wichtig, festzustellen, daß die darin offenbarte technische Lehre auf Systeme gerichtet ist, welche viel höhere als normale Leistungssystemfrequenzen wie beispielsweise Stromversorgung von Luftzeugen oder für Induktionsheizer (siehe einleitenden Teil) aufweisen. In der Praxis ist es unpraktisch, diese Art von Anordnung in normalen elektrischen Leistungs-

übertragungs- und Verteilungssystemen von 50 oder 60 Hz und Systemen von relativ hoher Leistung zu verwenden. Außerdem ist, da die Angleichungen der Induktanz durch eine mechanische Drehvorrichtung ausgeführt wird, der Betrieb derselben notwendigerweise langsam und daher ungeeignet für Leistungsübertragungsanwendung.

Hohe Kompensationspegel nahe bei 100 % können (1.) unsteuerbare Variationen in der Leistung oder in dem Strom für kleine Änderungen der Anschlußspannungen oder Winkel erzeugen; (2.) eine mögliche Beschädigung und ungedämpfte subsynchrone Oszillationen erzeugen; und (3.) große Übertragungsströme und Spannungen während Störungen aufgrund von Reihenresonanzbedingungen erzeugen.

Diese großen Übertragungsströme oder Spannungen können durch die Verwendung von Ableitern von lückenlosen Metalloxidvaristoren (MOV) zum Schutz vor Überspannungen der Reihenkondensatoren vermieden werden. Durch Begrenzung der Überspannung über den Reihenkondensatoren, unter solch hohen Übertragungsstrombedingungen auf den Ableitpegel der MOV Ableiter, hat die Wirkung, daß der effektive Kapazitätswert der Reihenkondensatoren während der Übertragungsperiode verändert wird. Das verstimmt zeitweise den Reihenresonanzschaltkreis und verhindert, daß der Übertragungsstrom hohe Werte erreicht.

Das erste und zweite oben erwähnte Problem kommt von dem Problem des Mangels einer geeigneten Steuerbarkeit der Leistung auf dem AC Übertragungssystem. Dieses Problem jedoch wird durch die vorliegende Erfindung gelöst.

In zwischen verbundenen Leistungssystemen gibt es manchmal das Problem des ungeplanten Leistungsflusses durch Teile des Netzwerkes aufgrund einer mangelnden Abstimmung zwischen geplanten und tatsächlichen Leistungsflüssen. Die vorliegende Erfindung erleichtert die Einstellung der relativen Impedanzen der verschiedenen Teile des Übertragungsnetzwerkes, um

die tatsächlichen Leistungsflüsse näher an die geplanten Leistungsflüsse zu bringen.

Die vorliegende Erfindung erleichtert weiterhin die Einstellung der Übertragungsimpedanzen für verschiedene Teile des Übertragungssystems, um die Leistungsflußbedingungen sicherzustellen, bei gleichzeitiger Minimierung der Verluste.

#### AUFGABEN DER ERFINDUNG

Die Vorrichtung der vorliegenden Erfindung umfaßt eine reihengeschaltete, statisch gesteuerte Reaktanz, die in ein AC Leistungsübertragungssystem eingefügt wird, zum schnellen stetigen Einstellen der Übertragungsimpedanz des Übertragungssystems. Die Vorrichtung kann feste oder schaltbare kapazitive oder induktive Reihenreaktanzen zum Betrieb mit den stetig eingestellten Reaktanzen fassen, um die Steuerempfindlichkeit und/oder den Steuerbereich zu erhöhen. Die Vorrichtung der vorliegenden Erfindung kann daher verwendet werden, um die Leistung oder den Strom in dem Übertragungssystem wirksam zu steuern, so daß die potentiellen Probleme der höheren Pegel von Reihen-kondensatorkompensation überwunden werden, wie auch um ungeplante Leistungsflüsse und Verluste in dem Übertragungssystem zu minimieren.

Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine neue statische Einrichtung zur Leistungssteuerung zu liefern, bei welcher die schnelle Feinsteuerung der Übertragungsimpedanz durch die Verwendung einer statisch gesteuerten Reihenreaktanz zu erleichtern;

es ist eine andere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen hohen Grad von Steuerbarkeit der Leistung auf der AC Übertragungsleitung zur Verfügung zu stellen;

es ist noch eine andere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen solchen hohen Grad von Steuerbarkeit der Leistung auf der AC Übertragungsleitung durch die Verwendung einer reihengesteuerten Reaktanzvorrichtung von relativ kleiner Größe zu

erreichen, welche ein bedeutender oder dominierender Teil der Übertragungsimpedanz wird;

es ist noch eine andere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine statisch gesteuerte Reihenreaktanz nach der vorliegenden Erfindung zu verwenden, um Reihenkondensatorkompensationspe- gel zu erleichtern, die deutlich höher als die bisher verwen- deten liegen;

es ist noch eine andere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die Übergangs- und dynamische Stabilität eines solchen Über- tragungssystems zu erhöhen durch Verwendung der statisch ge- steuerten Reihenreaktanz gemäß der vorliegenden Erfindung zu- sammen mit hohen Pegeln der Reihenkompensation;

es ist noch eine andere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die Einstellung der Werte der Impedanz von verschiedenen Tei- len eines Übertragungssystems zu erleichtern, um ungeplante Leistungsflüsse zu minimieren;

es ist noch eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die Einstellung der Impedanzwerte für verschiedene Teile des Übertragungssystems zu erleichtern, um Verluste zu minimie- ren.

Diese Aufgaben werden durch eine statisch gesteuerte Reak- tanzvorrichtung erfüllt, die in Reihe mit einer AC Leistungs- übertragungsleitung geschaltet ist, wie es in der vorliegen- den Anmeldung beschrieben ist.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Die vorliegende Erfindung richtet sich auf eine Vorrichtung zum Einstellen der Netzwerkimpedanz in einer Übertragungslei- tung, bei welcher eine gesteuerte Reaktanz in Reihe mit einer Übertragungsleitung verbunden ist. Die gesteuerte Reaktanz ist aus einem gesteuerten Induktor (Reaktor) aufgebaut, der parallel mit einer festen Reaktanz angeschlossen ist. Der ge- steuerte Induktor ist aus einem Induktor aufgebaut, der in Reihe mit einem statischen Schalter verbunden ist, welcher die Leitungsperiode des Induktors steuert, um die effektive

Reaktanz des Induktors zu verändern. Rückseitig verbundene Thyristoren können als seriell verbundene statische Schalter dienen. Durch Änderung der Leitungsperiode des Induktors ergibt sich ein nichtstetiger Strom durch den Induktor. Der parallele elektrische Schaltkreis aus festen Reaktanzen ist mit dem gesteuerten Induktor verbunden, um harmonische aufgrund des nichtstetigen Stromes zu filtern und um den gewünschten Bereich der variablen Reaktanz zu erreichen. Die gesteuerte Reaktanzvorrichtung, die den gesteuerten Induktor und die parallelen Reaktanzen umfaßt, kann direkt in Reihe mit der Übertragungsleitung oder über Sekundärwindungen eines Transformators verbunden werden, der seine Primärwindung in Reihe mit der Übertragungsleitung verbunden hat. Die Verbindung der Vorrichtung auf der Sekundärseite des Transformators erleichtert die Anordnung der Vorrichtung in einer Delta-Konfiguration in einem Dreiphasensystem, um Triple-Harmonische zu eliminieren. Eine weitere Verminderung der Harmonischen, die durch die Vorrichtungen erzeugt werden, ist möglich durch Aufteilen der Vorrichtungen in zwei zur Verbindung in Y- und deltaverbundenen Sekundärwicklungen des Transformators mit der Primärwicklung, die seriell mit der Übertragungsleitung verbunden ist.

Die vorliegende Erfindung überwindet die oben erwähnten ersten und zweiten Probleme, die in dem Abschnitt "Hintergrund der Erfindung" dieser Anmeldung diskutiert wurden, durch Einführung einer statisch gesteuerten seriellen Reaktanz, durch die die variable Reaktanz ein bedeutender, wenn nicht sogar dominanter Teil der Übertragungsimpedanz wird. Durch Änderung dieser gesteuerten Reaktanz kann die Übertragungsimpedanz ausreichend verändert werden, um die Leistung oder den Strom auf der Übertragungsleitung wirksam zu steuern. Die Verwendung dieser variablen Reaktanz in Verbindung mit den hohen Pegeln der Reihenkondensatorkompensation erlaubt es, die Vorrichtung so aufzubauen, daß sie relativ klein und von wirtschaftlicher Größe wird. Zum Beispiel wird bei einer 100 %igen Kompensation durch Reihenkondensatoren der seriellen

induktiven Reaktanz als Teil der Übertragungsimpedanz die Übertragungsimpedanz im wesentlichen sehr klein entsprechend den Reihenwiderständen. In diesem Fall kann eine statisch gesteuerte Serienreaktanzvorrichtung von kleiner Größe, zum Beispiel 10 % der unkompenzierten Übertragungsimpedanz, eine Steuerung über einen großen Bereich der Leistung oder des Stromes ergeben. Dadurch, daß die dominierende Übertragungsimpedanz steuerbar wird, kann das Problem der unkontrollierten Leistungsschwankungen während kleiner Störungen auf den hohen Niveau der festen seriellen Kondensatorkompensation im wesentlichen überwunden werden. Die Leistung oder der Strom des Systems können einfach innerhalb bestimmter Grenzen durch fast stetige Steuerung der Übertragungsimpedanz gesteuert werden. Da die Leistungsvariation empfindlich auf Variationen in der statisch gesteuerten Reaktanz ist, wird durch die dynamische Steuerung der Vorrichtung gemäß der Erfindung die Dämpfung von allen potentiellen subsynchronen Oszillationen erleichtert.

Die Größe der Vorrichtung, die notwendig ist zur schnellen Einstellung der Impedanz, hängt von dem Bereich und der Empfindlichkeit der gewünschten Leistungssteuerung ab. Die Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung kann auf jedem Niveau der Serienkondensatorkompensation und selbst ohne Serienkondensatorkompensation verwendet werden, beispielsweise in dem Falle einer kurzen Leitung. Bei einem Betrieb nahe von 100 % Serienkompensation mit dieser Vorrichtung wird diese Leistung auf der Leitung empfindlicher gegenüber Anschlußspannungsbeträgen, wodurch es möglich ist, die Leistung durch Steuerung der Anschlußspannungen durch beispielsweise einen mechanischen oder Festkörpertransformator-Abgreifänderer, durch Steuerung von synchroner Maschinenanregung oder durch statische VAR-Systeme zu steuern. Die Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung kann betrieben werden, um schnelle Änderungen der Übertragungsimpedanz zu erzeugen, um die Übertragungsstabilität zu erhöhen oder um die Leistung oder den

Strom durch die Übertragungsleitung zu modulieren, um die dynamische Stabilität zu verbessern.

Das Problem des ungeplanten Leistungsflusses aufgrund einer fehlenden Abstimmung zwischen tatsächlichen und geplanten Leistungsflüssen in einem Übertragungssystem ist im wesentlichen ein Problem der Steuerung der relativen Impedanzen von verschiedenen Teilen des Netzwerks, um den erforderlichen Leistungsfluß einzustellen. Die Vorrichtung der vorliegenden Erfindung stellt die Impedanz von verschiedenen Teilen des Netzwerks ein, um die Leistungsflußplanung abzustimmen und dadurch den geplanten Leistungsfluß zu minimieren.

Da die Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung die Impedanzen von verschiedenen Teilen des Netzwerks einstellt, kann sie verwendet werden, um die Impedanzen in einer solchen Weise einzustellen, daß Verluste des Gesamtsystems oder Teile des Systems minimiert werden.

#### BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

Die Figuren 1(a) und 1(b) erläutern zwei Arten der Verbindung einer Vorrichtung zum schnellen Einstellen der Netzwerkimpedanz gemäß der vorliegenden Erfindung, wie sie in den Figuren 2, 3a und 3b in Zusammenhang mit einem AC-Leistungsübertragungssystem dargestellt ist. Jede dieser Figuren kann alternativ eine Leitung eines Dreiphasen-AC-Leistungsübertragungssystems oder einen einphasigen AC-Leistungsschaltkreis darstellen.

Mit Bezug auf Figur 1(a) überträgt eine AC-Übertragungsendvorrichtung 2 Leistung an eine AC-Aufnahmeeindvorrichtung 4 über die Übertragungsleitung 6, 8. Für die Netzwerkimpedanzkompensation und Leistungssteuerung ist eine Vorrichtung 10 zum schnellen Einstellen der Netzwerkimpedanz gemäß der Lehre der vorliegenden Erfindung seriell in der Übertragungsleitung vorgesehen.

Alternativ ist, wie in Figur 1(b) gezeigt ist, wobei gleiche Elemente mit dem gleichen Bezugszeichen versehen sind, überträgt die AC-Übertragungsendvorrichtung 2 Leistung über die Übertragungsleitung 6, 8 zu der AC-Aufnahmeeindvorrichtung 4 in derselben Weise wie in Figur 1(a). In gleicher Weise ist eine Vorrichtung 10 zum schnellen Einstellen der Netzwerkimpedanz gemäß der Lehre dieser Erfindung für die Wechselwirkung mit der Übertragungsleitung vorgesehen. Jedoch ist in der Ausführungsform von Figur 1(b) ein Reihentransformator 12 vorgesehen, der eine Primärspule 14 in Reihe mit den Übertragungsleitungen 6, 8 und eine Sekundärspule 16, an welche die Vorrichtung 10 zur schnellen Einstellung der Netzwerkimpedanz gemäß der vorliegenden Erfindung verbunden ist, vorgesehen.

Diese Anordnung unter Verwendung von Reihentransformatoren erfordert zusätzliche Kosten für die Transformatoren, aber hat mehrere Vorteile. Die Verwendung von Transformatoren ergibt eine Flexibilität in der Wahl der Spannung und Strompegel in der Vorrichtung zur schnellen Einstellung der Netzwerkimpedanz gemäß der Erfindung, welche in der bevorzugten Ausführungsform rückseitig verbundene Thyristoren verwendet. Weitere Vorteile der Verwendung von solchen Transformatoren werden später diskutiert.

Eine bevorzugte Ausführungsform der Vorrichtung zum schnellen Einstellen der Netzwerkimpedanz 10 von Figur 1(a), 1(b) ist in Figur 2 erläutert. Ein Induktor X, 20 ist seriell mit einer statischen Schaltvorrichtung (allgemein als 22 bezeichnet) verbunden, um einen gesteuerten Induktor 21 zu bilden. Die statische Schaltvorrichtung umfaßt in der bevorzugten Ausführungsform ein Paar von rückseitig verbundenen Thyristoren 24, 26 mit Gates 24G bzw. 26G. Während in der bevorzugten Ausführungsform ein Paar von Thyristoren 24, 26 als Schaltvorrichtung verwendet wird, können andere geeignete Leistungsschaltvorrichtungen wie beispielsweise Gate-Ausschaltthyristoren oder saturierende Reaktoren verwendet werden, an-

statt der Thyristoren in der bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung oder ein Einzeltriac.

Eine zusätzliche Reaktanz  $X_p$ , 28 ist parallel zum gesteuerten Induktor 21 vorgesehen. Diese zusätzliche Reaktanz  $X_p$ , 28 kann zwei Funktionen haben. Der diskontinuierliche Strom durch den gesteuerten Induktor 21 erzeugt Harmonische, wobei die Charakteristischen die ungeraden Harmonischen 3, 5, 7, 9, 11, 13 etc. sind. Diese Harmonische werden durch den harmonischen Filter innerhalb der zusätzlichen Reaktanz  $X_p$ , 28, der parallel dazu verbunden ist, gefiltert. Abhängig von der harmonischen Beschaffenheit, die für bestimmte Anwendungen erforderlich ist, können die harmonischen Filter aus abgestimmten oder Breitbandfiltern bestehen. Zusätzlich kann ein fester oder schaltbarer Kondensator oder Induktor als ganzes oder Teil der zusätzlichen Reaktanz  $X_p$ , 28 verwendet werden, um den erforderlichen Bereich der Variation der Impedanz der Vorrichtung 10 zu erhalten. Die zusätzliche Reaktanz  $X_p$ , 28 kann ganz oder teilweise aus einer existierenden Reaktanz oder einer Reaktanzvorrichtung in der Übertragungsleitung gebildet sein.

Nimmt man beispielsweise an, daß der Induktor X, 20 einen Wert von 10 Ohm bei der Fundamentalfrequenz hat, dann hat der gesteuerte Induktor 21 eine Reaktanz, welche auf jeden Wert von 10 Ohm oder darüber geregelt werden kann. Wenn die zusätzliche Reaktanz  $X_p$ , 28 eine induktive Reaktanz von 40 Ohm bei der Fundamentalfrequenz hat, ist es möglich, einen Variationsbereich der Impedanz über der Vorrichtung 10 von 8 Ohm bis 40 Ohm induktiv zu erhalten aufgrund der parallelen Kombination von 40 Ohm mit 10 Ohm und darüber, die durch den gesteuerten Induktor 21 entwickelt werden.

Das Wesen dieser parallelen zusätzlichen Reaktanz  $X_p$ , 28 kann weitergehend mit Bezug auf die Figuren 3(a) und 3(b) verstanden werden. In den Ausführungsformen von den Figuren 3(a) oder 3(b) ist ein fester Kondensator 30 oder ein fester In-

duktor 34 parallel mit dem Harmonischfilter 32 in Parallelverbindung mit dem gesteuerten Induktor 21 gezeigt. Bei der Fundamentalfrequenz haben die harmonischen Filter 32 kapazitive Reaktanz. Die Impedanz der Parallelkombination der harmonischen Filter 32 und des festen Kondensators 30 oder festen Reaktors 34 kann kapazitiv oder induktiv sein. Die Gesamtimpedanz über die Vorrichtungen zwischen den Punkten A und B in den Figuren 2 und 3 kann eine kapazitive Reaktanz oder eine induktive Reaktanz sein, abhängig von den relativen Werten der zusätzlichen Reaktanz  $X_p$ , 28 und dem gesteuerten Induktor 21. Wenn es notwendig ist, kann ein fester oder schaltbarer Reihenkondensator 36, wie er durch gestrichelte Linien in der Ausführungsform der Figuren 3(a) und 3(b) gezeigt ist, mit der Basisvorrichtung verwendet werden, um das Reihenkompensationsniveau anzuheben, wie es für Übertragungserfordernisse gewünscht wird, oder um die effektive Steuerung der variablen Reaktanz auf der übertragenen Leistung oder Strom zu erhöhen.

Um die Ausfallzeit der Schaltvorrichtung 22 und insbesondere der Thyristoren 24, 26 in der bevorzugten Ausführungsform zu begrenzen, kann der Induktor X, 20 zweigeteilt werden und an beiden Seiten der Schaltvorrichtung 22 vorgesehen werden. Wenn der Widerstand und der Ventilspannungsabfall in der Vorrichtung vernachlässigt werden und wenn angenommen wird, daß der Leistungsstrom vernachlässigbare Harmonische enthält, dann ist die Spannung zwischen den Punkten A und B in den Figuren 2 und 3 gleich dem Produkt des Leistungsstromes und der effektiven Fundamentalfrequenzreaktanz  $X_{eff}$  der Vorrichtungen zwischen den Punkten A und B. Durch Steuerung des Sättigungswinkels der Thyristoren 24, 26 zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$  dieser Spannung kann der Leistungswinkel  $\sigma$  der gesteuerten Reaktanz verändert werden. Diese Steuerung des Sättigungswinkels der Thyristoren 24, 26 durch Zuführen von Steuerungssignalen zu ihren jeweiligen Gates 24g, 26g kann in jeder konventionellen Weise nach dem Stand der Technik für Leistungselektronik ausgeführt werden. Aufgrund der einzigartigen Konfiguration der

Vorrichtung 10 ist es möglich, den Sättigungswinkel der Thyristoren durch die Verwendung des Stromsignals von der Leitung oder von dem parallelen Festreaktanzschaltkreis als Bezugsteuersignal variiert werden. Diese Variationen des Leitungswinkels des gesteuerten Induktors auf diese Weise hat den Effekt der Veränderung seiner induktiven Reaktanz. Insbesondere der Sättigungswinkel  $\alpha$  der Thyristoren und der Leitungswinkel  $\sigma$  des thyristorgesteuerten Reaktors ist durch die Gleichung gegeben

$$\sigma = 2\pi - 2\alpha \quad (1)$$

Wenn bei den vollen Bedingungen die Fundamentalfrequenzreaktanz des gesteuerten Konduktors 21 gleich  $X$  ist, dann ist die effektive Fundamentalfrequenzreaktanz  $X_v$  bei jedem Leitungswinkel gegeben durch die Gleichung

$$X_v = \frac{\pi X}{\sigma - \sin \sigma} \quad (2)$$

Wenn  $X_p$  die Fundamentalfrequenzreaktanz der zusätzlichen Reaktanz 28 parallel zu dem thyristorgesteuerten Reaktor ist, dann ist die effektive Fundamentalfrequenzreaktanz  $X_{eff}$  der Vorrichtung zur schnellen Einstellung der Netzwerkimpedanz bestimmt durch die Parallelkombination von  $X_p$  und  $X_v$  und ist

$$X_{eff} = \frac{X_p \cdot X_v}{X_p + X_v} \quad (3)$$

Damit kann durch Veränderung des Sättigungswinkels der Thyristoren die Impedanz der Vorrichtung verändert und gesteuert werden.

Im Unterschied zu den thyristorgesteuerten Reaktoren in konventionellen statischen Nebenschluß-VAR-Systemen ist die Spannung über die Vorrichtung über einen großen Bereich mit dem Thyristorsättigungswinkel und dem Leistungsstrom veränderbar. Jedoch kann diese Spannung aus der oben gegebenen Formel  $X_{eff}$

und dem Leistungsstrom berechnet werden. Wenn der rms Wert des Leistungsstroms gleich  $I$  ist, dann ist der rms Wert der Spannung über die Vorrichtung  $V$  zwischen den Punkten A und B gegeben durch

$$V = I \cdot X_{\text{eff}} \quad (4)$$

Wenn die Spannung  $V$  und der Sättigungswinkel der Thyristoren bekannt ist, können die harmonischen Ströme, die durch den diskontinuierlichen Strom in dem gesteuerten Induktor 21 erzeugt werden, durch die bekannte Theorie von thyristorgesteuerten Reaktoren bestimmt werden. Der rms Wert der  $n$ -ten charakteristischen harmonischen Komponente  $I_n$  ist:

$$I_n = \frac{V}{X} \frac{4}{\pi} \left| \frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right| \quad (5)$$

Die Vorrichtung zum schnellen Einstellen der Netzwerkimpedanz 10, wie sie in den Figuren 3(a) oder 3(b) erläutert ist, kann ebenso in den Sekundärwicklungen des Reihentransformators 12 von Figur 1(b) eingesetzt werden, wenn dies gewünscht wird. Die Verwendung des Reihentransformators erlaubt eine Flexibilität in der Wahl der Spannungs- und Strompegel in dem thyristorgesteuerten Reaktorschaltkreis. Außerdem würde in einem AC Dreiphasenübertragungssystem der Transformator die Delta-verbindung der Impedanzeinstellvorrichtung gemäß der Lehre der vorliegenden Erfindung erleichtern, wodurch die Filteranforderung für Triple Harmonische (dritte, neunte, fünfzehnte etc.) vermindert wird.

Die Figur 4(a) erläutert eine 6-Puls Anordnung, die die Vorrichtungen zur schnellen Angleichung der Netzwerkimpedanz 10 in einem transformatorverbundenen System verwendet. Eine Deltaanordnung (allgemein als 40 bezeichnet) der Vorrichtungen zur schnellen Angleichung der Netzwerkimpedanz 10 umfaßt drei Vorrichtungen zur schnellen Angleichung der Netzwerkimpedanz 10, D1-D3, die in einer Deltakonfiguration angeordnet

sind. Jede der Vorrichtungen zum schnellen Angleichen der Netzwerkimpedanz ist über eine jeweilige Sekundärspule oder Wicklung S1-S3 eines Transformators T1-T3 angeschlossen. Eine entsprechende Primärspule oder Wicklung jedes Transformators T1-T3 ist in Reihe mit einer Übertragungsleitung L1-L3 eines AC Dreiphasenübertragungssystems zum Übertragen einer AC Leistung von einer AC Übertragungsendvorrichtung an einem Ende der Übertragungsleitungen L1-L3 zu einer AC-Empfangsendvorrichtung an dem anderen Ende desselben verbunden.

Die 6-Pulsanordnung von Figur 4(a) umfaßt Sekundärspulen des Transformators, die in einer Deltakonfiguration verbunden sind. Eine alternative 6-Pulsanordnung verbindet die Sekundärwicklungen der Transformatoren in einer Y-Konfiguration mit drei Vorrichtungen zum schnellen Angleichen der Netzwerkimpedanz, die in einer Deltakonfiguration angeordnet sind und mit den Sekundärwicklungen des Transformators verbunden sind.

In der Ausführungsform von Figur 4(b) ist eine 12-Pulsanordnung unter Verwendung einer Delta-Y-Konfiguration erläutert. Ähnliche Elemente zu Figur 4(a) sind mit den gleichen Bezugszeichen versehen. In der Ausführungsform von Figur 4(b) sind sechs Impedanzeinstellvorrichtungen gemäß der Lehre der vorliegenden Erfindung (D4-D6 und D7-D9) verwendet. Die Reihentransformatoren D1-D3 haben zwei Sekundärspulen (S1a-S3a und S1b-S3b). Die Impedanzeinstellvorrichtungen D4-D6 sind in einer Deltakonfiguration (allgemein als 50 bezeichnet) angeordnet, welche ähnlich zu der von Figur 4(a) ist. Diese Deltakonfiguration ist mit einem ersten Satz von Sekundärspulen S1a-S3a in Deltakonfiguration in der gleichen Weise verbunden, wie die Transformatorsekundärspulen S1-S3 in Figur 4(a).

Zudem sind die Impedanzeinstellvorrichtungen D7-D9 von Figur 4(b) in einer Deltakonfiguration (allgemein als 60 bezeichnet) angeordnet und mit dem zweiten Satz von Sekundärspulen S1b-S3b des Reihentransformators in einer Y-Konfiguration

verbunden. Ein Ausgang von jeder Sekundärspule S1b-S3b ist gemeinsam an einer Zwischenverbindungsleitung 62 verbunden.

Die 12-Pulsanordnung von Figur 4(b) erlaubt die Minimierung von harmonischen Filtererfordernissen durch Eliminierung von Harmonischen (fünfte, siebte, siebzehnte, neunzehnte etc.), welche nicht charakteristisch für den 12-Pulsbetrieb sind.

Die Steuerung der Thyristoren 24, 26 der statischen Schaltvorrichtung 22 von jeder Vorrichtung zum schnellen Angleichen der Netzwerkimpedanz 10 kann vervollständigt werden, wie es einem Fachmann naheliegt und wie es häufig im Stand der Technik für Vorrichtungen wie beispielsweise statische VAR Systeme oder HVDC Übertragungssysteme getan wird. Die Steuerung dieser Vorrichtungen würde die Messung von geeigneten Systemvariablen, die Bestimmung der Sättigungswinkel der Thyristoren zur Erzielung der erforderlichen Stabilzustand- und Übergangscharakteristiken und die Erzeugung von Sättigungspulsen erfordern. Jedoch liegen diese Techniken im Können eines Fachmanns.

Jede Vorrichtung zum schnellen Einstellen der Netzwerkimpedanz 10 oder ihrer Komponententeile erfordert einen Schutz wie er normalerweise für solche Vorrichtungen in Leistungssystemen wie beispielsweise Ableiter, erzwungene Sättigung von Thyristoren zur Verhinderung von Ventilausfällen und/oder Nebenleitungsschaltungen oder Lücken und geeignete Erdungsanordnungen erforderlich ist.

Die Erfindung wurde entwickelt und erklärt hauptsächlich in Bezug auf elektrische Leistungsübertragungssysteme, doch ist sie offensichtlich auf andere Hochspannungs- und Niederspannungsleistungsschaltkreise anwendbar und solche Anwendungen sind durch die Erfindung gedeckt.

EP 87 901 254.0  
John Vithayathil

**Patentansprüche**

1. Vorrichtung in einer AC-Leitung zwischen ersten und zweiten AC-Einrichtungen zur Impedanzeinstellung in der AC-Leitung mit einer Reaktaneinrichtung (28, 30, 34) in Reihe mit der AC-Leitung, einer gesteuerten Induktoreinrichtung (21), die in Reihe mit der AC Leitung und parallel mit der Reaktaneinrichtung (28, 30, 34) verbunden ist, worin die gesteuerte Induktoreinrichtung (21) eine Reihenverbindung eines Induktors (20) mit einer Schalteinrichtung (22) umfaßt zur einstellbaren Steuerung der Leitungsperiode des Stromes, der durch den Induktor (20) fließt, um die effektive Reaktanz des Induktors zu verändern.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1 mit
  - einem Transformator, der eine Primärspule und eine Sekundärspule aufweist, wobei die Primärspule in Reihe mit der AC-Leitung verbunden ist;
  - der gesteuerten Induktoreinrichtung und der dazu parallel verbundenen Reaktanz, die mit der Sekundärspule des Transformators verbunden sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, worin die AC-Leitung eine Dreiphasenübertragungsleitung ist, die drei Leiter umfaßt, von denen jeder Leiter einen solchen Transformator mit seiner Primärspule in Reihe verbunden aufweist, wobei die gesteuerte Induktoreinrichtung und die parallel dazu verbundene Reaktanz mit der Sekundärspule des jeweiligen Transformators verbunden sind.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, worin die Sekundärspulen und die gesteuerte Induktoreinrichtung mit den parallel

verbundenen Reaktanzen in einer Deltakonfiguration zusammen verbunden sind.

5. Vorrichtung nach Anspruch 3, worin die Sekundärspulen des Transformators in einer Y-(Ypsilon) Konfiguration verbunden sind, wobei die gesteuerten Induktor-einrichtungen und die damit parallel verbundenen Reaktanzen in einer Deltakonfiguration angeordnet sind und in einer Y-Verbindung mit den Sekundärspulen verbunden sind.
6. Vorrichtung nach Anspruch 3, worin jeder der Transformatoren erste und zweite Sekundärspulen umfaßt, wobei die ersten Sekundärspulen von jedem Transistor in einer Dreiphasen-Delta-Konfiguration zusammen verbunden sind, und die zweiten Sekundärspulen von jedem Transistor in einer Dreiphasen-Y-Konfiguration verbunden ist;  
jede gesteuerte Induktoreinrichtung und ihre verbundenen Reaktanzen sind in einer Dreiphasen-Delta-Konfiguration verbunden, wobei eine Delta-Konfiguration mit dem Delta verbundenen Sekundärspulen verbunden ist und die andere Deltakonfiguration mit den Y verbundenen Sekundärspulen des Transformators verbunden sind.
7. Vorrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 6, worin die Reaktanzen harmonische Filter umfassen zum Filtern der Harmonischen, die durch den diskontinuierlichen Strom in der gesteuerten Induktoreinrichtung verursacht werden.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, worin die parallele Reaktanz von induktiver Art ist.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, worin die parallele Reaktanz von kapazitiver Art ist.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, die weiterhin eine Kapazität in Reihenverbindung mit der gesteuerten Induktoreinrichtung in der AC-Leitung umfaßt, um das Reihenkondensatorkompensationsniveau in der AC-Leitung anzuheben.
11. Vorrichtung nach Anspruch 10, worin die Kapazität eingeschalteter Kondensator ist.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, worin die Schaltungseinrichtung umfaßt:
  - zwei Thyristoren, die rückseitig verbunden sind und je ein Steuergate haben; und
  - Einrichtungen, die mit den Steuergates verbunden sind, zum Steuern der Aktivierung der Thyristoren, um dadurch die Impedanz dieser Vorrichtung zu steuern.
13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, worin der Induktor erste und zweite Induktorteile umfaßt, die in Reihe mit der Schalteinrichtung verbunden sind, wobei die Schalteinrichtung dazwischen angeordnet, um den Fehlstrom durch die Schalteinrichtung zu begrenzen.

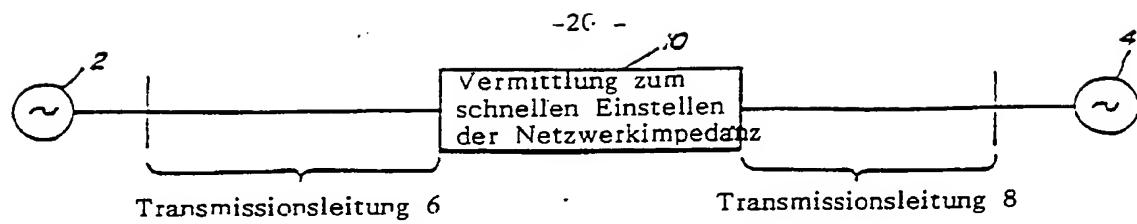


FIG. 1(a)

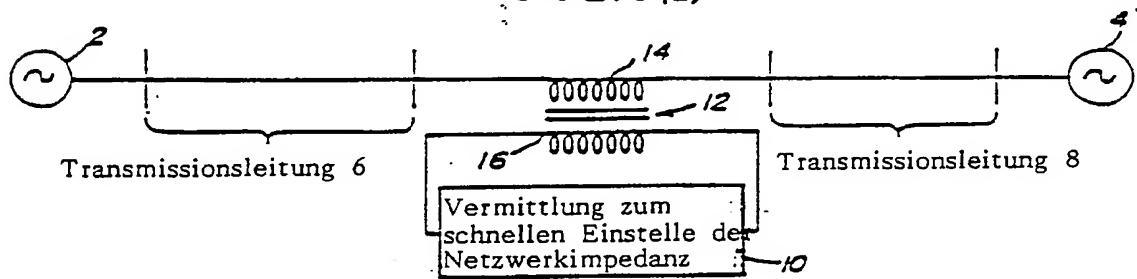


FIG. 1(b)

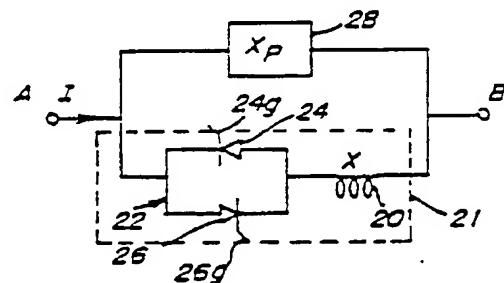


FIG. 2

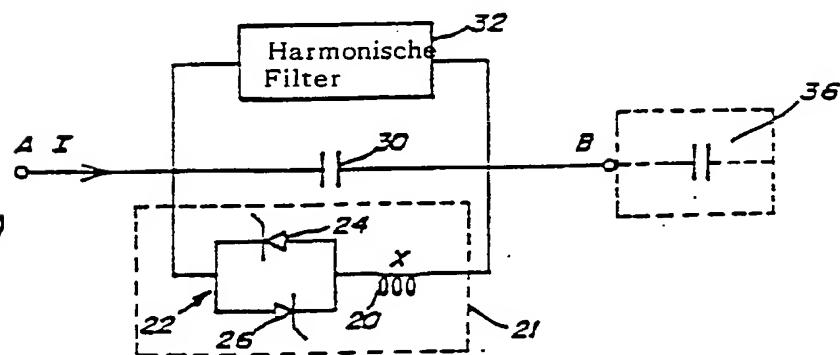


FIG. 3(a)

